

**ПРИМЕНЕНИЕ ЧИСЛЕННЫХ МЕТОДОВ ПРИ РЕШЕНИИ
ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАДАЧ ЭЛЕКТРОДИНАМИКИ***Шиликин М.С., Мительман Ю.Е.*

ФГАОУ ВО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»,
Екатеринбург, Россия

mikhail.shishkin@urfu.me y.e.mitelman@urfu.ru

Аннотация. Цель работы – разработка программы для численного моделирования характеристик зеркальных антенн. Программа позволяет по заданным пользователем данным (тип антенны и облучателя, рабочая частота, тип поляризации, размеры антенной системы) построить эскиз облучателя и антенной системы, рассчитать диаграммы направленности облучателя и антенны в прямоугольной, полярной или сферической системах координат; рассчитать распределение тока в апертуре. Точность расчетов подтверждена путем сравнения полученных в программе результатов с характеристиками существующих антенн.

Ключевые слова: параболическая зеркальная антенна, коэффициент направленного действия, диаграмма направленности, апертурный метод.

**APPLICATION OF NUMERICAL METHODS IN SOLVING PRACTICAL
PROBLEMS OF ELECTRODYNAMICS***Shishkin M., Mitelman Y.*

Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education «Ural Federal
University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin», Ekaterinburg,
Russia

Abstract. The purpose of the work is to develop a program for numerical simulation of the reflector antennas. The program allows using the data specified by the user (type of antenna and feed and its dimensions, frequency, polarization) to image a sketch of the antenna system, calculate the radiation patterns of the feed and antenna in rectangular, polar or spherical systems coordinates; calculate the current distribution in the aperture. The accuracy of the calculations was confirmed by comparing the results obtained in the program with the characteristics of the existing antennas.

Key words: parabolic reflector antenna, directivity, radiation pattern, geometrical optics, aperture distribution method.

1 ВВЕДЕНИЕ

Численные методы представляют собой отдельную область математики и применяются в различных прикладных направлениях. Такие методы являются одним из мощных математических средств решения задач. Существует достаточно много задач, где без достаточно сложных численных методов не получить ответа, часто требуется выполнить огромное число действий за короткое время. Это становится возможным благодаря использованию современных компьютеров. Одной из областей науки и техники, где не обойтись без применения методов численного моделирования, является электродинамика. Среди численных методов, применяемых в настоящее время при автоматизации расчетов антенн или высокочастотных устройств, используются: метод конечных разностей, метод конечных элементов, метод конечного интегрирования, метод моментов, метод матрицы линий передачи и др.

Существует множество различных программ для моделирования и расчета различных типов антенн [1]–[5], некоторые программы, такие как *MATLAB*, имеют встроенный функционал для расчета некоторых типов антенн [6]. Однако, большая часть современного программного обеспечения стоит очень дорого, кроме того, процесс создания модели антенны часто занимает достаточно много времени (до нескольких часов) и требует специальных навыков [1], [2]. Чтобы упростить создание модели антенны, часто применяются дополнительные программы, например, *Antenna Magus* для *CST* [3] и *PathWave* для *EMPro* [4].

В статье представлено описание одного из методов численного моделирования применительно к зеркальным антеннам. На основе описанного метода разработана программа с графическим интерфейсом в *MATLAB*, позволяющая достаточно быстро и с достаточно высокой точностью оценить основные характеристики зеркальных параболических антенн, таких как коэффициент направленного действия (КНД), коэффициент использования поверхности (КИП), диаграмма направленности (ДН). Кроме того, программа позволяет рассчитывать характеристики облучателей, строить их конструкции и конструкции зеркал.

2 ОПИСАНИЕ ПРИМЕНЯЕМОГО МЕТОДА РАСЧЕТА

Характерной особенностью зеркальной антенны является то, что форму ДН в дальней зоне определяют главным образом геометрические параметры антенны [7]. Задача определения диаграммы направленности антенны состоит в решении уравнений Максвелла с граничными условиями, заданными на поверхности антенны [8]. Такое решение может быть получено в простейших случаях и на практике, как правило, не применимо. Применительно к зеркальным антеннам лежат два закона – закон отражения и закон сохранения энергии в

элементарных пучках, при этом предполагается, что диаметр раскрыва зеркала во много раз больше длины волны [8].

Согласно [9] и [10], существует два способа записи интегралов излучения: интегрирование по поверхности плоского раскрыва и по тыльной стороне параболоида; интегрирование по криволинейной поверхности, проходящей по освещенной и по теневой сторонам параболоида. На основании указанных способов записи интегралов излучения, существует два метода решения внутренней задачи (расчета распределения тока) для зеркальных антенн:

- апертурный метод: раскрыв плоский, токи считаются синфазными между собой, а распределение амплитуд зависит от ДН облучателя и фокуса;
- токовый метод: расчет на поверхности параболоида, направление токов меняется от точки к точке на поверхности зеркала.

Апертурный метод более простой в реализации и позволит проводить расчеты достаточно быстро, что будет явным преимуществом. Метод основан на принципах геометрической оптики: параболоид возбуждается облучателем, помещенным в фокусе зеркала, лучи, направляемые из фокуса от облучателя, отражаются от параболоида (зеркала) и становятся параллельными ее оси. Для оценки интеграла излучения при расчете зеркальных антенн наиболее применима замена интеграла суммированием по точкам [11], [12]: излучающая поверхность (апертура) зеркальной антенны разбивается на заданное пользователем число точек, расположенных на одинаковом расстоянии друг от друга, плоские координаты точек x_n и y_n в системе зеркала преобразуются в сферические координаты в системе облучателя и в каждой точке рассчитываются амплитуды зависящие от диаграммы направленности облучателя $F_{обл}$ и фокусного расстояния f (пример рассчитанного распределения тока показана на рисунке 1):

$$E = \frac{\cos^2(\theta/2)}{f} \cdot F_{обл}(\theta, \varphi). \quad (1)$$

Далее считается ДН зеркальной антенны по формуле:

$$F(\theta, \varphi) = \frac{1 + \cos(\theta)}{2} \cdot \sum_{n=1}^N E_n \cdot e^{j\beta \cdot R_n \cdot \cos(\alpha)}, \quad (2)$$

где β – волновое число,

$R_n \cos(\alpha)$ – разность хода лучей в точку наблюдения, проведенных из начала координат и из точки x_n и y_n , определяющаяся формулой:

$$R_n \cdot \cos(\alpha) = \sin(\theta) \cdot \{x_n \cdot \cos(\varphi) + y_n \cdot \sin(\varphi)\}. \quad (3)$$

На основе полученной ДН, используя встроенные инструменты MATLAB, рассчитывается КНД в направлении максимального излучения, а по значению КНД и площади раскрыва определяется КИП антенны.

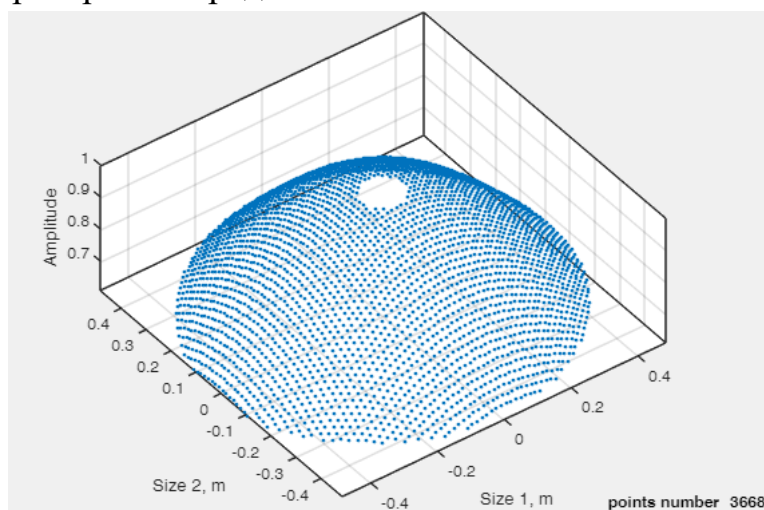


Рисунок 1 – Распределение тока в апертуре прямофокусной антенны

Описанный метод позволяет рассчитать характеристики излучения однозеркальных или двухзеркальных антенн. При этом, форма апертуры зеркала может быть, как прямоугольной, так и эллиптической. Основные геометрические уравнения для расчета зеркальных антенн, используемые в программе, взяты из [9] и [13]–[17]. Расчет облучателей реализован с помощью Antenna Toolbox в MATLAB, где используется метод моментов [6]. Для облучателей, согласно методикам, приведенным в [9] и [13]–[17], определены оптимальные размеры, которые устанавливаются в программе автоматически при выборе типа облучателя.

Для определения точности расчетов по предложенной методике были выполнены ряд тестов, где сравнивались параметры реальных антенн, представленные в [18]–[22], с рассчитанными. Результаты сравнения приведены в таблице. Видно, что расчеты характеристик антенн достаточно точны.

Таблица – Результаты выполненных расчетов характеристик антенн

Сравниваемая антенна	КНД, дБ		Ширина ДН, град.	
	<i>Рассчитанный</i>	<i>Измеренный</i>	<i>Рассчитанная</i>	<i>Измеренная</i>
CC12-WB4G [18]	22	22,5 ±0,5	11,16	11,5 ±0,5
CP12-HP4G [18]	27,8	28,3 ±0,5	4,15	4,5 ±0,5
4.8 M Cassegrain [19]	43,4	44,2	1,035	1,04
3.8 M Antenna [20]	41,3	42,2	1,17	1,16
GD25-24 [21]	24,05	25	7,4×10,05	8×10
QSD75 [22]	38	38,5	2,35	2,3

3 ИНТЕРФЕЙС ПРОГРАММЫ

Главное окно разработанной программы показано на рисунке 2. В программе используются три основных меню: меню общих настроек, меню настроек облучателя и меню настроек антенны (рисунок 3). Функциональные кнопки используются для расчета конкретного параметра антенной системы. Результаты расчетов отображаются в окне отображения результатов. В меню настроек задается рабочая частота и единицы измерения размеров зеркал и облучателя, выбирается система координат для отображения плоских диаграмм направленности и масштаб их отображения. В меню настроек облучателя, выбирается тип облучателя и его размеры. В меню настроек антенны выбирается тип антенны и форма основного зеркала (прямоугольник или эллипс), задаются размеры зеркал.

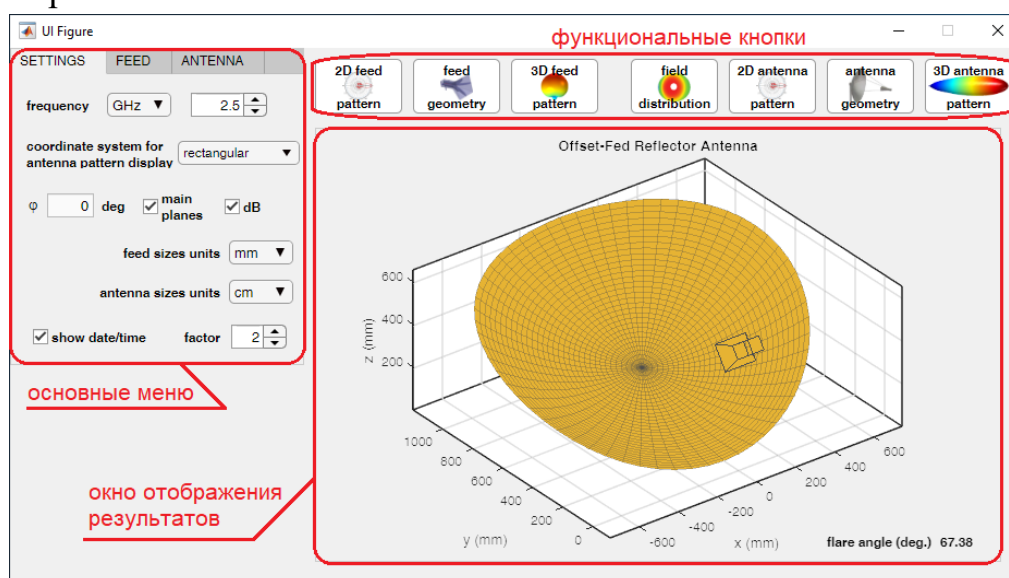


Рисунок 2 – Главное окно разработанной программы

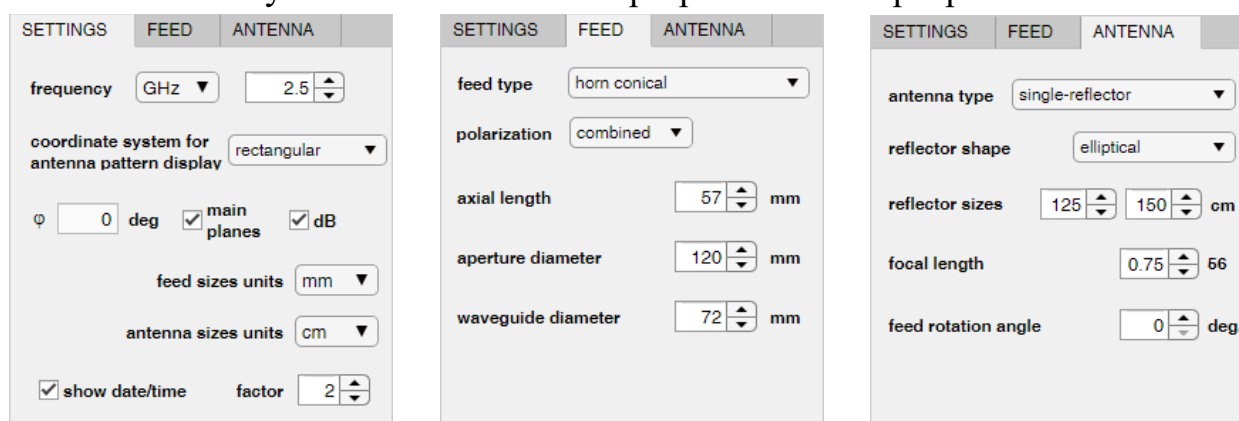


Рисунок 3 – Основные меню разработанной программы

Разработанная программа выполнена как модуль (APP) для MATLAB. По ссылке [23] можно скачать установщик (на русском или английском языке) и ознакомиться с возможностями программы.

4 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная программа имеет простой, понятный и удобный интерфейс и обладает следующими преимуществами:

- нет необходимости создавать конструкцию антенны, программа позволяет пользователю просмотреть ее геометрию по введенным данным;
- широкий выбор форм и размеров рефлекторов и облучателей;
- легко адаптируется для расчета других типов антенн и облучателей;
- время расчета характеристик антенны невелико;
- количество точек в раскрыве можно настроить для оптимального соотношения точность / время расчета;
- Antenna Toolbox позволяет достаточно точно рассчитать ДН облучателя.

Библиографический список

1. Altair FEKO Applications [Электронный ресурс] / Altair Engineering, Inc., 2021. – Режим доступа: <https://www.altair.com/feko-applications>.
2. Ansys HFSS [Электронный ресурс] / ANSYS Inc., 2021. – Режим доступа: <https://www.ansys.com/products/electronics/ansys-hfss>.
3. CST Studio [Электронный ресурс] / Dassault Systemes, 2021. – Режим доступа: <https://www.3ds.com/products-services/simulia/products/cst-studio-suite>.
4. PathWave EM Design (EMPro) [Электронный ресурс] / Keysight Technologies, 2021. – Режим доступа: <https://www.keysight.com/us/en/products/software/pathwave-design-software/pathwave-em-design-software.html>.
5. GRASP Reflector antenna design software [Электронный ресурс] / TICRA, 2021. – Режим доступа: <https://www.ticra.com/software/grasp>.
6. MATLAB and Simulink [Электронный ресурс] / MathWorks, Inc., 2021. – Режим доступа: <https://www.mathworks.com>.
7. Вуд П. Анализ и проектирование зеркальных антенн: Пер. с англ. / П. Вуд – М.: Радио и связь, 1984. – 208 с.
8. Галимов Г.К. Общая теория зеркальных антенн. Том 6 / Г.К. Галимов – М.: ООО «Адвансед Солюшнз», 2017. – 704 с.
9. Сазонов Д.М. Антенны и устройства СВЧ: Учеб. для радиотехнич. спец. вузов / Д.М. Сазонов – М.: Высш. шк., 1988. – 432 с.
10. Sharma S.K. Handbook of Reflector Antennas and Feed Systems. V. I: Theory and Design of Reflectors / S.K. Sharma, S. Rao. Artech House, 2013. – 323 с.
11. C. Allen. Numerical integration methods for antenna pattern calculations / IRE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 7, no. 5, pp. 387-401, 1959.
- A. Ludwig. Computation of radiation patterns involving numerical double integration / IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 16, no. 6, pp. 767-769, 1968.

12. Мительман Ю.Е. Проектирование высокочастотных устройств и антенных систем / Ю.Е. Мительман. – Екатеринбург: УрФУ, 2018. – 59 с.
13. Филонов А.А., Устройства СВЧ и антенны: учебник / А.А. Филонов, А.Н. Фомин, Д.Д. Дмитриев. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2014. – 492 с.
14. Гололобов Д.В. Распространение радиоволн и антенно-фидерные устройства. Ч.3: Антенны / Д.В. Гололобов. – Мн.: БГУИР, 2006. – 164 с.
15. Milligan, Thomas A. Modern antenna design / Thomas A. Milligan. – Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2005. – 633 с.
16. Chen, Z.N. Handbook of Antenna Technologies, 1st ed. / Z.N. Chen, D. Liu, H. Nakano, X. Qing, T. Zwick. – New York, NY: Springer, 2016. – 3470 с.
17. DATA SHEETS [Электронный ресурс] / Comarcom Ltd, 2021. – Режим доступа: <https://www.comarcom.com/data-sheets>.
18. FIXED GEO ANTENNAS [Электронный ресурс] / Communications & Power Industries LLC, 2021. – Режим доступа: <https://www.cpii.com/product.cfm/15/112/498>.
19. Teleport Antennas 3.8M Antenna [Электронный ресурс] / Comsat Systems Pvt Ltd, 2021. – Режим доступа: <http://www.comsatsystems.co.in/index.php/Publicview/showProductDetails/31>.
20. GD25-24P-NF [Электронный ресурс] / Infinity-electronic, 2021. – Режим доступа: https://www.infinite-electronic.ru/product/Laird-Technologies-Antennas_GD25-24P-NF.aspx.
21. QSD75 [Электронный ресурс] / TELEVÉS, 2021. – Режим доступа: www.televes.com/ru/g-063-antenna-parabolicheskaja-iz-aljuminija-qsd75.html.
22. Программа для автоматизированного проектирования зеркальных параболических антенн [Электронный ресурс] / М.С. Шишкин // Екатеринбург, 2021 – Режим доступа: <https://yadi.sk/d/KHJRkc3FhHwK9A?w=1>.